Technical Note

Public Works Canada | Travaux publics Canada

Solar Programs Office (613) 998-9817

No. 24: June, 1984

Sources of Error in Measuring Solar Energy in DHW Systems

1. SYNOPSIS

The proper selection and installation of heat metering equipment is essential to the accurate measurement of solar energy contribution in domestic hot water systems. While inaccuracies inherent to heat meters account for an error of about 2%, the inadequate selection and installation of metering equipment lowers measured energy output by up to 14%. This note describes the operation of heat meters and discusses sources of error. The cumulative effect of these errors is analyzed.

2. INTRODUCTION

Heat meters are used throughout northern Europe to meter the energy used by individual homes and industries that are supplied with heat from a central or district heating plant. They have been successfully used in solar hot water applications as well, though care must be taken to ensure accurate results. Metering equipment must be appropriate to the load profile and load size of a given application and must be properly installed. In spite of all precautions, however, problems inherent to the monitoring equipment itself lower measured solar energy contributions.

3. HEAT METER OPERATION

Heat meters consist of the following parts: a flow meter complete with pulse head on the cold water line, an integrator with a display unit, and two temperature sensors — one located in the hot water line and one in the cold water line. The flow meter measures the flow of fluid through the system. The fluid moves a turbine or vane that is linked to a pointer on the face of the flow meter. A magnet is attached to the pointer and as the pointer moves around the dial, the change in the magnetic field causes the pulse head to send an electrical signal to the integrator. The pulses generated relate directly to the fluid volume. Simultaneously, the flow is measured, the integrator computes the difference in temperature between the two temperature probes, and the energy delivered is calculated according to the following equation:

$$Q = mC_p (T_{out} - T_{in}) \qquad (1)$$

where m = fluid mass

C_p = specific heat of fluid (normally water, C_p = 4.190 MJ/(kg.°C)

T_{out} = temperature sensed by the hot water sensor

T_{in} = temperature sensed by the cold water sensor

The result of this calculation is displayed on a read-out unit. If a fluid other than water is used, compensation for the difference in specific heat and specific gravity must be made. Some heat meters have built-in, compensating circuitry, while others require an adjustment of the displayed output.

The energy collected by a solar system can be determined at various points in the system, but the results are more accurate if a high temperature differential is considered. By measuring the total energy across the solar and auxiliary systems rather than the energy delivered by the collectors, a large, consistent temperature differential, usually around 50°C, can be measured. The auxiliary energy contribution and auxiliary losses are to be subtracted from the total energy measured to obtain the net solar energy contribution.

4. ERROR SOURCES

Sources of error in measuring energy in DHW systems include:

- location of the cold and hot water sensors
- selection of the flow meter pulse head
- inherent inaccuracies of the flow meters and temperature sensors.

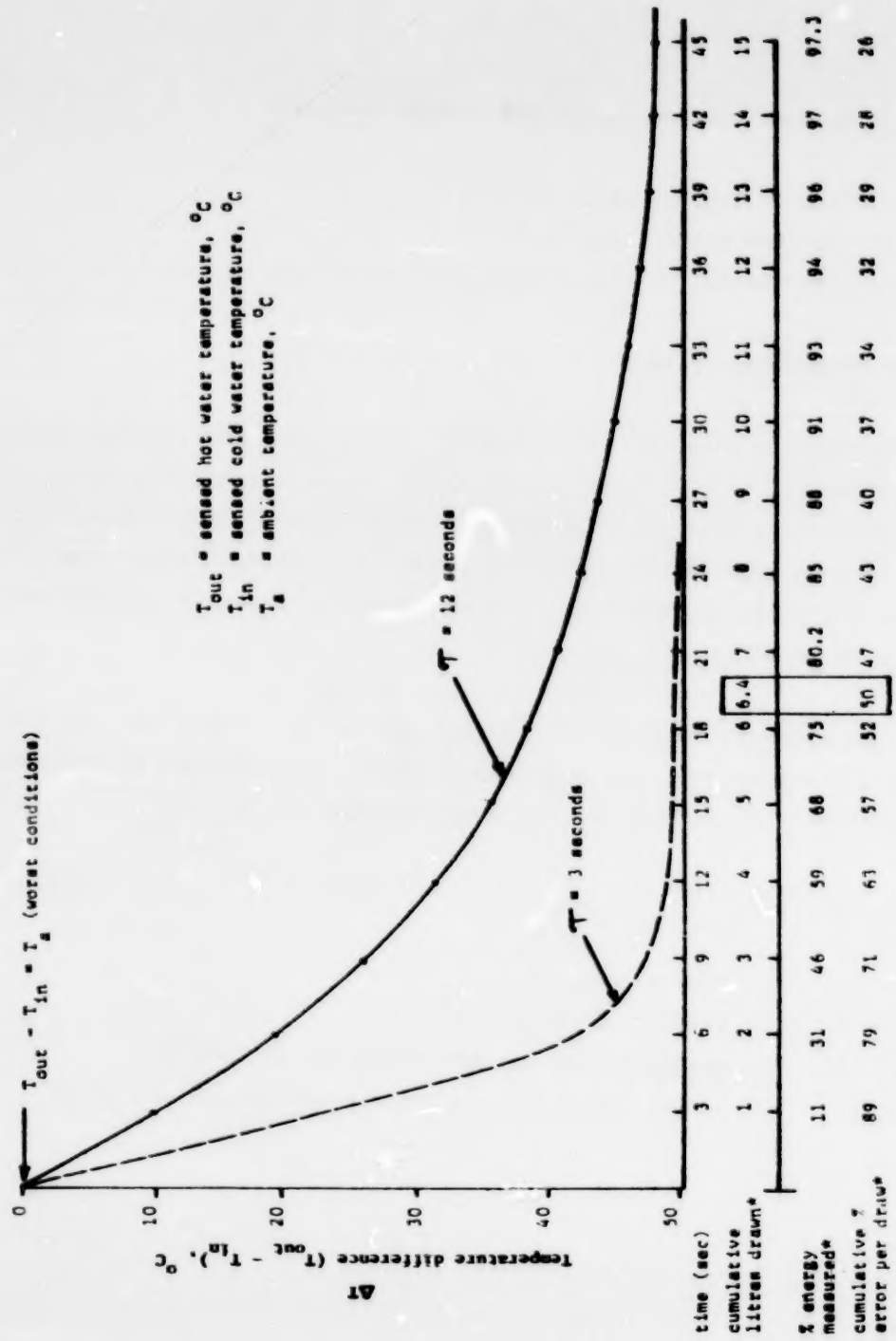
4.1 Location of the Temperature Probes

Ideally, the hot-side temperature sensor should be fully immersed in the auxiliary storage tank. However, if a pressure relief valve has been installed in the hot water outlet, then the sensor can be inserted into a "thermal trap", which should be installed as close as possible to the outlet (ref. 1). The cold-side sensor should be installed at the solar storage tank; its tip should be directly in the flow path of the incoming mains water.

If a probe is not properly located, the thermal mass of the sensor and the thermal well will slow its response to changing temperatures. The lagtimes of the cold and hot water sensors are governed by the following equation:

$$T_{c\ measured} = e^{-t/\tau} (T_{c\ actual}) \qquad (2)$$

where t = time in seconds
τ = time constant (12 seconds)
$T_{c\ measured}$ = measured temperature difference at time t
$T_{c\ actual}$ = actual instantaneous temperature change at time 0



*Data corresponds to τ = 12 sec.

Figure 1: Cumulative % Error Per Draw

From equation (2) it is calculated that 12 seconds after a draw is initiated the measured change in water temperature is 36.8% of the actual change. With properly located sensors the error in measured temperatures are small and the effect of the lag minimal. However, with improperly located sensors this lag leads to significant errors, especially following a period of no hot water draw. Between draws, the temperature of the water surrounding the sensors tends to approach and can even reach ambient conditions. When a water draw does occur there is an instantaneous change in the sensing conditions and the sensors are exposed to the full temperature rise of the hot water system. Due to the large time constant of the sensors, the calculation of ΔT is very inaccurate in the early stages of such a draw. The effect of the lagtime depends on a number of factors, including:

- the time constant of the sensor
- the degree to which the temperature of the water surrounding the sensors has approached ambient
- the level of insulation of the piping system
- the flow rate during the draw (which determines the volume of water affected by the error).

Figure 1 illustrates the cumulative error during a draw. It shows:

- the measured temperature difference as a percentage of the actual temperature difference with time, assuming that both the hot and cold water sensors reached ambient temperatures before the draw
- the cumulative litres drawn with time, assuming a flow rate of 20 L/min
- the measured energy as a percentage of actual energy used to heat each litre of the draw
- the cumulative error for the total draw.

A flow rate of 20 L/min was chosen because it is an average flow rate for medium-sized hot water system and is easily attainable in houses with good water pressure. When draws are sporadic, as they are in domestic applications, a higher flow rate gives a higher error in measuring the cumulative energy consumed. (This is not usually the case for industrial and commercial applications in which there are large, continous hot water demands.)

Figure 1 shows that the errors for the first stages of a draw are very high if sensors have reached ambient temperatures. For example, the error in measuring the energy used to fill a 6 to 7 L wash basin is 50% (see Figure 1). The error for a 15 L kitchen sink is 25%. The errors for a load of laundry that uses 35 L of hot water and a shower that uses 100 L are 11% and 4% respectively.

Water draws of 10 litres or less comprise 10% of total daily DHW usage (ref. 2). Energy measurements on these small draws are considered to be completely inaccurate; therefore, the error due to the improper location of the sensors is estimated at 10%.

4.2 Pulse Head Sensitivity

While pulse heads that emit one pulse every 10 litres of hot water draw are adequate for commercial and industrial systems, more sensitive heads (one pulse per litre) should be specified for low- or sporadic-draw applications such as residences.

Example: A water draw of 9.5 L is made. A head that gives one pulse every 10 litres will not generate a pulse until the next draw. Meanwhile, the hot- and cold-side water temperatures approach ambient; the first 0.5 litre of the next draw would generate a pulse and the entire 10 litres is measured in error. For the same 9.5 L draw, a one pulse per litre head generates nine accurate pulses and only the final 0.5 L of draw is in error.

As mentioned previously, 10-L draws comprise about 10% of total daily DHW consumption. Therefore, the error due to the inappropriate selection of pulse heads is approximately 10%.

4.3 Flow Meter

Flow meters are calibrated for hot water line in district heating applications. In solar systems, the recommended installation is on the cold water line for longer service life. Due to the change in water density, this introduces an error of about 2% in energy measurements.

4.4 Probe Type

Most heat meters available in Canada use DIN standard platinum RTDs; others use thermistors. Standard commercial sensor leads with a time constant of 12 seconds cost about $80 a pair; more sensitive sensors with a time constant of 3 seconds are available, but they cost about $300 a pair. If properly installed (ref. 1), 12-second sensors are sufficiently accurate for most domestic applications. Whatever the type, sensors should be ordered as matched pairs. This allows small temperature differences to be measured as accurately as possible. A margin of error of $\pm$1% is acceptable.

5. ERROR ANALYSIS

Table 1 summarizes the sources and magnitude of error in measuring solar energy contribution. It shows whether the error raises or lowers measured energy values.

Table 1

Error Source	Error*
Location of temperature sensors, e_1	-10% (in residential applications)
Pulse rate, e_2	-10% (in residential applications)
Flow meter equipment, e_3	-2%
Temperature sensor equipment, e_4	$\pm$1.0%

* The magnitudes of error are calculated using a standard residential domestic hot water load and load profile as per CSA Standards (ref.2).

Using the data from Table 1, the error in energy measurement due to the location of the temperature sensors and the pulse rate, E_1, is:

$$E_1 = \left((e_1)^2 + (e_2)^2 \right)^{1/2} = \left((10)^2 + (10)^2 \right)^{1/2} = 14.14\% \qquad (3)$$

The maximum error inherent in the flow meter and the temperature sensors, E_2, is:

$$E_2 = \left((e_3)^2 + (e_4)^2 \right)^{1/2} = \left((2)^2 + (1)^2 \right)^{1/2} = 2.24\% \qquad (4)$$

The total error, E, is calculated according to the following equation:

$$E = E_1 + E_2 = 14.14 + 2.24 = 16.38\% \qquad (5)$$

Therefore, the cumulative error in measuring solar energy contribution in domestic DHW systems can be as much as 16%.

In commercial and industrial applications the error component E_1 is zero due to the continuous nature of the hot water demand; thus the cumulative error is approximately 2% (from equation 4). This low level of error can be achieved in sporadic-draw systems if the energy-measuring equipment is properly selected and installed. Specifically, the thermal mass of the temperature sensors should not exceed 12 seconds and the pulse rate should be one pulse/litre.

6. RECOMMENDATIONS AND CONCLUSIONS

Heat meters should be selected according to the load profile and load size of the application. Sensitive pulse heads and fast response temperature probes should be specified for residential systems whenever necessary.

The cumulative error for residential applications is about 16%, depending on the type of metering equipment used and the installation practices followed. The error can be reduced to 2% if sensitive pulse rates and a maximum of 12 seconds response temperature sensors are used. The level of error in industrial and commercial sites is typically 2% due to the continuous nature of the hot water demand.

The installation of heat meters should be supervised or at least checked by a qualified person to ensure that proper installation practices are followed. The location and mounting of temperature sensors are of particular importance (ref. 1).

7. REFERENCES

1. "Monitoring Equipment Installation Guidelines", Solar Programs Office, Public Works Canada, May 1984.

2. Canadian Standards Association, Solar Domestic Hot Water Systems Liquid-to-Liquid Heat Transfer F379-M1982, July 1983.

3. "Review of Monitoring of the Solar DHW Packages", a technical study, May 1984, by Buchan, Lawton and Parent, Ottawa. Contract no. 330-422-4.

4. Study provided under contract no. 330-842, by SS Solar Consulting, March 1983.

Guide technique

Travaux publics Canada | Public Works Canada

Bureau des programmes solaires (613) 998-9817

N° 24: juin 1984

Causes d'erreur sur la mesure de l'énergie solaire dans les chauffe-eau solaires domestiques

1. RÉSUMÉ

Pour mesurer avec précision l'apport de l'énergie solaire dans les chauffe-eau solaires domestiques, il est essentiel de choisir et d'installer adéquatement le matériel de comptage de l'énergie thermique. Les erreurs associées aux compteurs d'énergie thermique sont d'environ 2%, mais la valeur mesurée peut être jusqu'à 14% inférieure à la valeur réelle lorsque l'équipement de comptage est mal choisi ou mal installé. Dans le présent article, on décrit le fonctionnement des compteurs d'énergie thermique et on étudie les causes d'erreur. On analyse l'effet cumulatif de ces erreurs.

2. INTRODUCTION

Les compteurs d'énergie thermique sont utilisés partout dans le nord de l'Europe pour mesurer l'énergie consommée par les maisons résidentielles et les industries qui sont alimentées en chaleur à partir d'une installation de chauffage central ou urbain. On les a aussi utilisés avec succès pour le chauffage solaire de l'eau, mais il faut être prudent si on veut obtenir des résultats précis. Le matériel de comptage doit être adapté au profil de charge et à la grandeur de la charge d'une application donnée, en plus d'être bien installé. Toutefois, malgré toutes les précautions, les problèmes associés au matériel de contrôle lui-même se traduisent par une sous-estimation des apports de l'énergie solaire mesurée.

3. FONCTIONNEMENT DU COMPTEUR D'ÉNERGIE THERMIQUE

Un compteur d'énergie thermique comprend les éléments suivants: un débitmètre avec émetteur d'impulsions placé sur la conduite d'eau froide, un intégrateur avec unité d'affichage, et deux sondes de température, l'une placée dans la conduite d'eau chaude et l'autre dans la conduite d'eau froide. Le débitmètre mesure le débit de fluide dans le système. Le fluide déplace une turbine ou une aube qui est reliée à une aiguille de cadran placée sur le débitmètre. Un aimant est fixé à l'aiguille, et lorsque cette dernière se déplace devant le cadran, la variation du champ magnétique provoque l'émission par l'émetteur d'impulsions d'un signal électrique envoyé à l'intégrateur. Les impulsions créées sont directement fonction du volume de fluide. Simultanément, il y a mesure du débit, calcul par l'intégrateur de la différence entre les températures des deux sondes et calcul de l'énergie fournie, basé sur l'équation suivante:

$$Q = mC_p\,(T_{sortie} - T_{entrée}) \qquad (1)$$

où

- m = masse du fluide
- C_p = chaleur spécifique du fluide (normalement de l'eau, 4,190 MJ/(kg.°C)
- T_{sortie} = température indiquée par la sonde de la conduite d'eau chaude
- $T_{entrée}$ = température indiquée par la sonde de la conduite d'eau froide

Le résultat de ce calcul est présenté sur une unité d'affichage. Lorsqu'on utilise un fluide autre que l'eau, il faut compenser la différence de chaleur spécifique et de densité. Certains compteurs ont un circuit de compensation intégré, mais pour les compteurs qui n'en ont pas, il faut corriger la valeur affichée.

L'énergie captée par un système solaire peut être mesurée en différents points, mais on obtient des résultats plus précis lorsqu'on considère une grande différence de température. En mesurant l'énergie totale dans l'ensemble du système solaire et du système auxiliaire plutôt que l'énergie fournie par les capteurs, on peut obtenir une différence de température importante et uniforme, habituellement de 50°C environ. Pour déterminer l'apport net de l'énergie solaire, il faut soustraire de l'énergie totale mesurée l'apport de l'énergie auxiliaire et les pertes auxiliaires.

4. CAUSES D'ERREUR

Les causes d'erreur sur la mesure de l'énergie dans les chauffe-eau solaires domestiques sont notamment:

- emplacement des sondes pour l'eau chaude et l'eau froide
- choix de l'émetteur d'impulsions du débitmètre
- erreurs propres aux débitmètres et aux sondes de température.

4.1 Emplacement des sondes de température

Idéalement, la sonde de température de l'eau chaude devrait être totalement plongée dans le réservoir de stockage auxiliaire. Cependant, lorsqu'une soupape de décharge a été installée dans la sortie d'eau chaude, la sonde peut être insérée dans un "piège thermique" qui devrait être installé le plus près possible de la sortie (réf. 1). La sonde pour l'eau froide devrait être installée sur le réservoir de stockage solaire; son extrémité devrait être placée directement dans l'eau de la conduite principale d'entrée.

Lorsqu'une sonde n'est pas placée au bon endroit, l'inertie thermique de la sonde et le puits thermique réduisent sa vitesse de réponse aux variations de température. Les retards des sondes d'eau chaude et d'eau froide obéissent à l'équation suivante:

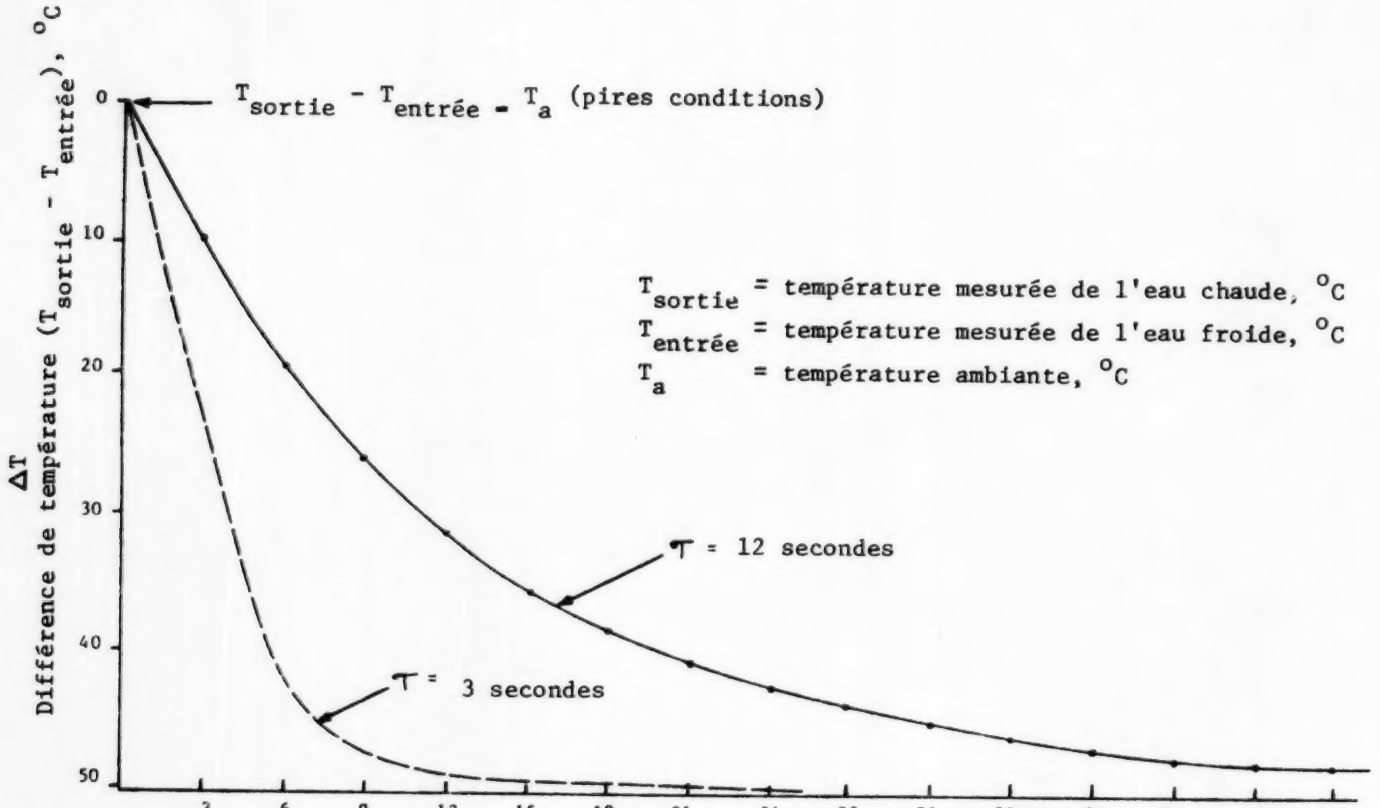
$$T_{c\ mesurée} = e^{-t/\tau}(T_{c\ actual}) \qquad (2)$$

où t = temps en secondes

τ = constante de temps (12 secondes)

$T_{c\ mesurée}$ = différence de température mesurée au temps t

$T_{c\ réelle}$ = variation de température instantanée réelle au temps 0



temps (s)	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	
litres prélevés cumulatifs*	1	2	3	4	5	6	6.4	7	8	9	10	11	12	13	14	15
énergie mesurée en %*	11	31	46	59	68	75		80.2	85	88	91	93	94	96	97	97.3
erreur cumulative par prélèvement en %*	89	79	71	63	57	52	50	47	43	40	37	34	32	29	28	26

* valeur pour = 12 s

Figure 1: Erreur cumulative par prélèvement en %

D'après le calcul fait à l'aide de l'équation (2), 12 secondes après le début d'un prélèvement, la variation mesurée de la température de l'eau est de 36,8% de la variation réelle. Lorsque les sondes sont placées aux bons endroits, les erreurs sur les températures mesurées sont faibles et l'effet des retards est minimal. Cependant, lorsque les sondes ne sont pas placées aux bons endroits, ces retards entraînent des erreurs appréciables, particulièrement après une période au cours de laquelle on n'a pas extrait d'eau chaude. Entre les prélèvements, la température de l'eau autour des sondes s'approche de la température ambiante et peut même l'atteindre. Lorsqu'on extrait de l'eau, il y a un changement instantané des conditions de détection et les sondes sont exposées à l'élévation complète de température du chauffe-eau. Étant donné que la constante de temps des sondes est grande, le calcul de ΔT est très peu précis au début du prélèvement. L'effet des retards dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment:

- constante de temps de la sonde
- degré suivant lequel la température de l'eau autour des sondes s'est approchée de la température ambiante
- degré d'isolation de la tuyauterie
- débit pendant le prélèvement (dont dépend le volume d'eau auquel s'applique l'erreur).

La figure 1 montre l'erreur cumulative au cours d'un prélèvement. Elle indique:

- la différence de température mesurée sous forme d'un pourcentage de la différence de température réelle en fonction du temps, en supposant que les sondes pour l'eau froide et l'eau chaude ont atteint la température ambiante avant le prélèvement,
- le nombre de litres cumulatifs prélevés en fonction du temps, en supposant un débit de 20 L/min,
- l'énergie mesurée sous forme d'un pourcentage de l'énergie réelle utilisée pour réchauffer chaque litre du volume prélevé,
- l'erreur cumulative sur le volume prélevé total.

On a choisi un débit de 20 L/min car c'est un débit moyen pour les chauffe-eau de grosseur moyenne et on peut facilement l'obtenir dans les maisons avec une bonne pression d'eau. Lorsque les prélèvements sont sporadiques, comme c'est le cas dans les applications domestiques, un débit plus élevé donne une plus grande erreur lorsqu'on mesure l'énergie cumulative consommée. (Il n'en est généralement pas ainsi dans les applications industrielles et commerciales, dans lesquelles les demandes d'eau chaude sont élevées et continues.)

La Figure 1 montre que les erreurs au début du prélèvement sont très élevées lorsque les sondes sont à la température ambiante. Par exemple, l'erreur sur la mesure de l'énergie utilisée pour remplir un lavabo de 6 à 7 litres est de 50% (voir Figure 1). L'erreur dans le cas d'un évier de 15 L est de 25%. Les erreurs dans le cas d'un lavage qui nécessite 35 L d'eau chaude et d'une douche qui en nécessite 100 L sont respectivement de 11% et 4%.

Les prélèvements d'eau de 10 L ou moins constituent 10% de la consommation quotidienne totale d'eau chaude domestique (réf. 2). On considère que les mesures d'énergie pour ces petits volumes sont très imprécises; par conséquent, on estime à 10% l'erreur produite lorsque les sondes ne sont pas placées aux bons endroits.

4.2 Sensibilité de l'émetteur d'impulsions

Les émetteurs qui émettent une impulsion par 10 litres d'eau chaude prélevés conviennent pour les systèmes commerciaux et industriels, mais on devrait utiliser des émetteurs plus sensibles (une impulsion par litre) lorsque les volumes d'eau prélevés sont faibles ou que le prélèvement est sporadique, par exemple dans les maisons.

Exemple: On prélève 9,5 L d'eau. Un émetteur qui émet une impulsion par 10 litres ne produira pas d'impulsion avant le prochain prélèvement. Entre temps, les températures de l'eau chaude et de l'eau froide s'approchent de la température ambiante. Le premier demi-litre du prélèvement suivant entraîne l'émission d'une impulsion et l'erreur de la mesure porte sur les 10 litres. Pour un même volume de 9,5 L, un émetteur qui produit une impulsion par litre émet 9 impulsions exactes et l'erreur ne porte que sur le dernier demi-litre du volume prélevé.

Comme on l'a déjà mentionné, les prélèvements de 10 L représentent environ 10% de la consommation quotidienne totale d'eau chaude domestique.

4.3 Débitmètre

Les débitmètres sont étalonnés pour la conduite d'eau chaude dans les applications de chauffage urbain. Dans les systèmes solaires, on recommande d'installer le débitmètre sur la conduite d'eau froide afin d'allonger la durée de service. En raison de la différence de masse volumique de l'eau, cette modification occasionne une erreur d'environ 2% sur les valeurs mesurées de l'énergie.

4.4 Type de sonde

Dans la plupart des compteurs d'énergie thermique disponibles au Canada, on utilise des sondes à résistance de platine; dans les autres, on utilise des thermistances. Les sondes commerciales ordinaires ayant une constante de temps de 12 secondes coûtent environ 80 $ la paire. Il existe des sondes plus sensibles ayant une constante de temps de 3 secondes, mais elles coûtent environ 300 $ la paire. Lorsqu'elles sont bien installées (réf. 1), les sondes à constante de temps de 12 secondes ont une précision suffisante pour la plupart des applications domestiques. Quel que soit leur type, les sondes doivent être commandées par paires compatibles. De cette façon, on peut mesurer de faibles différences de température avec la plus grande précision possible. Une marge d'erreur de $\pm$ 1% est acceptable.

5. ANALYSE D'ERREUR

Le Tableau 1 résume les causes et la grandeur de l'erreur sur la mesure de l'apport d'énergie solaire. Il montre si l'erreur se traduit par des valeurs d'énergie mesurées trop élevées ou trop faibles.

Tableau 1

Cause d'erreur	Erreur*
Emplacement des sondes de température, e_1	-10% (dans les applications résidentielles)
Fréquence des impulsions, e_2	-10% (dans les applications résidentielles)
Débitmètre, e_3	-2%
Sondes de température, e_4	$\pm$1,0%

D'après les données du Tableau 1, l'erreur sur la mesure de l'énergie attribuable à l'emplacement des sondes de température et à la fréquence des impulsions, E_1, est:

$$E_1 = \sqrt{(e_1)^2 + (e_2)^2} = \sqrt{(10)^2 + (10)^2} = 14,14\% \qquad (3)$$

L'erreur maximale associée au débitmètre et aux sondes de température, E_2, est:

$$E_2 = \sqrt{(e_3)^2 + (e_4)^2} = \sqrt{(2)^2 + (1)^2} = 2,24\% \qquad (4)$$

L'erreur totale, E, est calculée au moyen de l'équation suivante:

$$E = E_1 + E_2 = 14,14 + 2,24 = 16,38\% \qquad (5)$$

Par conséquent, l'erreur cumulative sur la mesure de l'apport d'énergie solaire dans les chauffe-eau solaires domestiques peut être aussi grande que 16%.

---

* La grandeur d'une erreur est mesurée pour une charge d'eau chaude domestique et un profil de charge normaux dans une résidence, conformément aux normes ACNOR (réf. 2).

Dans les applications industrielles et commerciales, la composante E_1 de l'erreur est nulle, étant donné que la demande en eau chaude est continue; l'erreur cumulative est alors d'environ 2% (d'après l'équation 4). Il est possible d'obtenir un niveau d'erreur aussi bas dans les systèmes à prélèvement sporadique lorsque le matériel de mesure de l'énergie est bien choisi et bien installé. Plus précisément, la constante de temps des sondes de températures ne devraient pas dépasser 12 secondes et la fréquence des impulsions devrait être d'une impulsion/litre.

6. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

On devrait choisir les compteurs d'énergie thermiques en fonction du profil et de la grandeur de la charge de l'application considérée. Dans les systèmes résidentiels, on devrait utiliser au besoin des émetteurs d'impulsions sensibles et des sondes de température à réponse rapide.

L'erreur cumulative dans les applications résidentielles est d'environ 16%, selon le type de matériel de mesure et les méthodes d'installations. On peut réduire l'erreur à 2% en utilisant des émetteurs d'impulsions sensibles et des sondes de température ayant un temps de réponse maximal de 12 secondes. Le degré d'erreur dans les applications industrielles et commerciales est généralement de 2% étant donné que la demande en eau chaude est continue.

Une personne qualifiée devrait surveiller ou au moins vérifier l'installation des compteurs d'énergie thermique afin d'assurer qu'elle est réalisée suivant des méthodes adéquates. L'emplacement et l'installation des sondes de température ont une importance particulière (réf. 1).

7. BIBLIOGRAPHIE

1. "Monitoring Equipment Installation Guidelines", Bureau des programmes solaires, Travaux publics Canada, mai 1984.

2. Association canadienne de normalisation, Chauffe-eau solaires domestiques (transfert de chaleur liquide-liquide), F379-M1982, juillet 1983.

3. "Review of Monitoring of the Solar DHW Package", étude technique, mai 1984, Buchan, Lawton et Parent, Ottawa, contrat n° 330-422-4.

4. Étude réalisée dans le cadre du contract n° 330-842 par SS Solar Consulting, mars 1983.